

Captura de carbono en cacao (*Theobroma cacao* L.): Una estrategia de adaptación al cambio climático

Carbon capture in cocoa (*Theobroma cacao* L.): a climate change adaptation strategy

Ángela Daniela Bermello Vélez ¹, Lorena Lucía Briones Intriago ¹,
Holanda Teresa Vivas Saltos ¹

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, campus
politécnico El Limón, Calceta, Ecuador.

Recibido 01 agosto 2024, aceptado 11 octubre 2024, en línea 07 diciembre 2024.

Resumen

La investigación evaluó la capacidad de los sistemas de producción de cacao para mitigar el cambio climático mediante la captura de carbono en sus componentes. Se analizaron dos plantaciones: una joven y otra adulta. La captura de carbono en la biomasa aérea se determinó mediante un método no destructivo y en el suelo a través del contenido de materia orgánica por calcinación. Los resultados mostraron que, aunque el cacao adulto tiene una biomasa total mayor, no hay diferencias significativas entre plantaciones. El cacao joven acumuló 54098,53 t de carbono, mientras que el adulto registró 1360125,00 t. La tasa de fijación de carbono fue de 27049,26 t/año en el cacao joven y 85007,81 t/año en el adulto. El suelo del cacao adulto tiene más carbono almacenado (7,15 tC/0,05 ha) que el suelo del cacao joven (4,73 tC/0,05 ha). Estos hallazgos confirman la efectividad del cacao en la captura de carbono.

Palabras clave: cacao, captura de carbono, cambio climático, biomasa, suelo, sostenibilidad.

Abstract

This study assessed the capacity of cocoa production systems to mitigate climate change by capturing carbon in their components. Two plantations were analyzed: one young and one adult. Carbon sequestration in aboveground biomass was determined by a non-destructive method and in soil through the content of organic matter by calcination. The results showed that although adult cocoa has a higher total biomass, there are no significant differences between plantations. Young cocoa accumulated 54098.53 t of carbon, while adult cocoa registered 1360125.00 t. The carbon fixation rate was 27049.26 t/year in young cocoa and 85007.81 t/year in adult. Adult cocoa soil has more carbon stored (7.15 tC/0.05 ha) than young cocoa soil (4.73 tC/0.05 ha). These findings confirm cocoa's effectiveness in carbon sequestration.

Keywords: cocoa, carbon sequestration, climate change, biomass, soil, sustainability.

Introducción

En los últimos 50 años, la temperatura media del planeta ha experimentado un aumento alarmante, principalmente debido a las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂) (Hernández, 2021). El CO₂, el GEI más abundante, ha registrado un incremento anual del 1,3% desde 2010 (Organización de Naciones Unidas [ONU], 2020).

Estas emisiones, generadas por sectores industriales, de servicios, hogares, transporte, calefacción urbana y producción de combustibles (Arroyo y Ramírez, 2020), son las responsables del aumento del nivel del

mar y del incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos (Ayuso, 2020).

El Plan de Implementación de la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Ecuador 2020-2025 (PI-NDC), informa que el país genera 80.627,16 Gg de CO₂-eq, ocupando el puesto 122 de 186 países en términos de contaminación (Castillo et al., 2022). El sector energético es el principal contribuyente con un 46,63%, seguido por uso del suelo, agricultura, procesos industriales y residuos (Centro de investigación y acción colectiva [FARO], 2020).

El cambio climático es un grave problema global causado principalmente por las actividades humanas,

* Correspondencia del autor:

E-mail: angela.bermello@espam.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia de creative commons: atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Los autores mantienen los derechos sobre los artículos y por tanto son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra.

como la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) (Vega et al., 2020). Estas actividades liberan gases de efecto invernadero que actúan como una manta atrapando el calor del sol, lo que eleva las temperaturas en la Tierra. Este fenómeno, conocido como calentamiento global, es una realidad que amenaza la vida en el planeta, afectando tanto a la flora como a la fauna, incluida la humanidad (Zavala y Romero, 2024).

Las plantaciones de cacao son una estrategia de mitigación del cambio climático, capturando entre 10 y 60 toneladas de CO₂ por hectárea en su biomasa aérea y proporcionando servicios ecosistémicos como la fijación biológica de nitrógeno y la reducción de la erosión (Hernández et al., 2021; Epquin, 2021). El almacenamiento de carbono en estos sistemas incluye el suelo, la biomasa de árboles, la hojarasca y las raíces (Asigbaase et al., 2021).

En Ecuador, las plantaciones de cacao cubren 601,000 hectáreas entre la Costa y Amazonía, con un 53% dedicado al cultivo de CCN51 y 43% a cacao nacional (Albán, 2023; Cevallos et al., 2022). En la provincia de Manabí, se encuentran 100,961 hectáreas de cacao, distribuidas entre monocultivos y asociaciones (Bravo et al., 2020).

La captura de carbono en plantaciones de cacao es una alternativa sostenible, ya que las plantas actúan como almacenes naturales de CO₂ (Orellana y Landi,

2023). Es crucial que los sistemas productivos se adapten al cambio climático y contribuyan a su mitigación (Manchabajoy et al., 2022). La mayoría de las plantaciones de cacao utilizan árboles de sombra, lo que beneficia la absorción y retención de carbono (Suárez et al., 2019; Hernández et al., 2021).

Por tanto, esta investigación se centra en evaluar la capacidad de los sistemas de producción de cacao como medida de mitigación del cambio climático, mediante el cálculo de la captura de carbono en cada uno de sus componentes.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la parroquia Ángel Pedro Giler, en el sitio La Pastora, perteneciente al cantón Tosagua, en la provincia de Manabí. La investigación se llevó a cabo en dos lotes, cada uno con 1300 plantas de cacao. El lote uno tiene una plantación joven de 2 años en un sistema de monocultivo de cacao injertado (variedades 800 y 801), mientras que el lote dos comprende una plantación de cacao nacional adulto de 16 años. La unidad muestral se conformó por dos parcelas circulares de 500 m², adaptando las propuestas de Ramos et al. (2021) y Hernández et al. (2021) (Figura 1).

La parcela en la plantación de 2 años incluyó un total

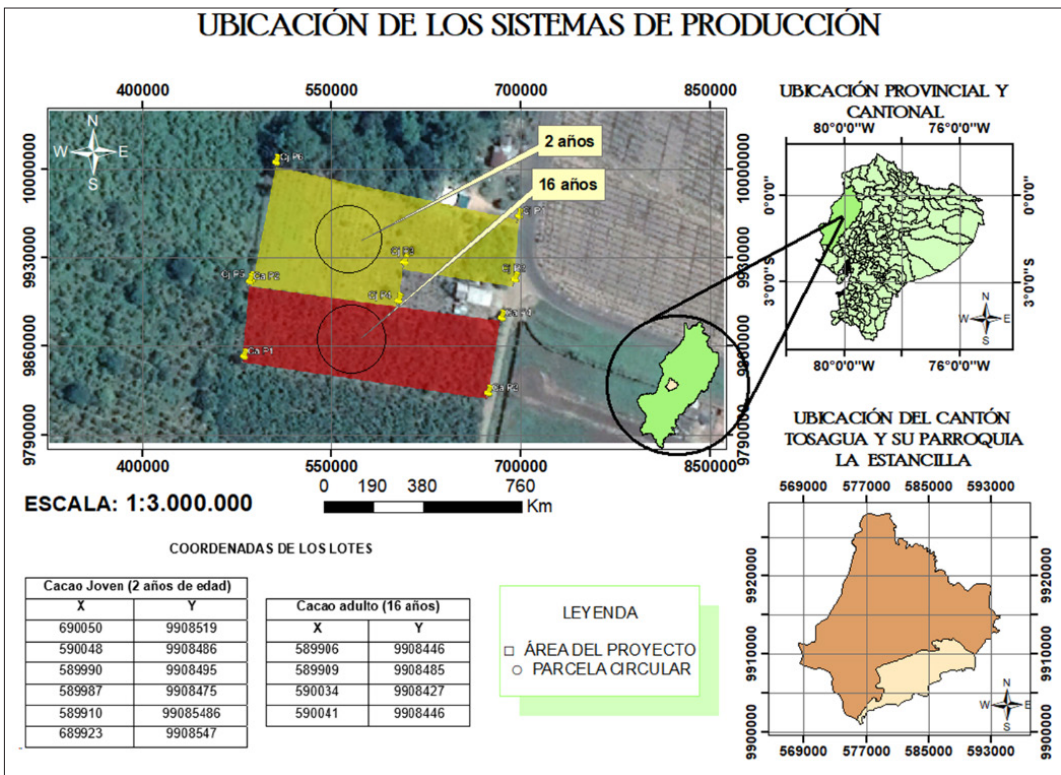


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de 76 árboles, mientras que la parcela en la plantación de 16 años abarcó 69 árboles.

El clima del cantón Tosagua se caracteriza por ser cálido y húmedo, con una temperatura promedio anual de 25,85°C. El gradiente térmico de la zona es de aproximadamente 1°C por cada 100 metros de elevación, lo que implica que la temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud. Además, el cantón presenta un déficit hídrico de 763,8 mm, lo que indica que la cantidad de agua que se evapora es mayor que la cantidad de agua que se precipita (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial [PDOT] del cantón Tosagua 2015-2019).

Determinación de la captura de carbono en sistemas de producción de cacao

2.2.1 Biomasa aérea total

Se calculó la captura de carbono en la biomasa aérea del cacao de los dos lotes mediante el método no destructivo o modelo alométrico desarrollado por Patiño et al. (2018), el cual se basa en la medición del diámetro basal a 30 cm desde la base del suelo (d_{30}) para las plantas de cacao (Ecuación 1).

$$B = 10^{-1,625 + 2,63 \cdot \log(d_{30})}$$

Dónde:

B= biomasa aérea total

d_{30} = diámetro a 30 cm del suelo

Biomasa muerta

Para cuantificar la hojarasca acumulada en un área específica, se aplicó la metodología propuesta por Surco y Garate (2022), que consiste en la extracción de muestras de hojarasca de cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m. Se registró el peso de cada muestra y se colocaron en bolsas de papel debidamente codificadas. Posteriormente, las muestras se sometieron a un proceso de secado en estufas a 75°C hasta alcanzar un peso seco constante, y luego se aplicó la ecuación [2] propuesta por Romero et al. (2022).

$$PST = \frac{PSs}{PFs} * PFT [2]$$

En dónde:

PST= Peso seco total de biomasa muerta

PSs= peso seco de la submuestra

PFs= peso fresco de la submuestra

PFT= peso fresco total

Factor de conversión= 0,04

Biomasa total

La biomasa total se determinó con base a la metodología de Zavala y Vega (2021) mediante la ecuación [3]:

$$BS\ total = B + PST [5]$$

En dónde:

BS= Biomasa seca total

B= Biomasa aérea total

PST= Peso seco total de biomasa muerta

Determinación de carbono en la biomasa

El contenido de carbono en la biomasa implicó la multiplicación de la biomasa total por una fracción de 0,5 fundamentado en la premisa de que la materia seca contiene aproximadamente un 50% del carbono capturado por la biomasa. Para llevar a cabo esta corrección, se utilizó la ecuación [4].

$$CT = BT \times FC [4]$$

CT= carbono total en toneladas (t)

BT= biomasa Total en toneladas (t)

FC= 0,5

Tasa de fijación de carbono

La tasa de fijación de carbono se obtuvo aplicando la ecuación [5], según los lineamientos de Mena y Andrade (2021):

$$TFC = CT / EA [5]$$

TFC= Tasa de fijación de carbono de carbono

CAB= carbono total en toneladas

EA= edad de la plantación

Determinación del carbono fijado en el suelo en sistemas de producción de cacao

Cálculo del carbono fijado en el suelo

Con base en la metodología propuesta por Dilas y Huamán (2020) se empleó la ecuación [6] para el cálculo del carbono fijado en el suelo:

$$CS = \left(\frac{CC}{100}\right) * Da * v [6]$$

Donde:

CS=Carbono en suelo

CC=Contenido de carbono (%)

Da=Densidad aparente

v=volumen de suelo a 30 cm de profundidad

Densidad aparente, contenido de carbono y materia orgánica en el suelo

Para determinar la densidad aparente, se aplicó la metodología de Zavala y Vega (2021) y Zavala et al. (2019). Se excavó un hoyo de 30 cm de profundidad mediante el método del cilindro posteriormente se sometieron a un proceso de deshidratación en estufa a 105 °C por 24 h.

$$Da(g/cc) = \frac{PSN}{VCH} [7]$$

Donde:

Da (g/cc) = Densidad aparente

PSN= Peso seco del suelo dentro del cilindro

VCH= Volumen cilindro (constante)

$$CC = \frac{MO}{1.724} [8]$$

Donde:

CC=Contenido de carbono (%)

MO=% de materia orgánica obtenido del análisis químico

Para determinar la Materia Orgánica en el Suelo (MOS) se aplicó la ecuación .

$$\% MOS = \frac{\text{peso a } 105^{\circ}C - \text{peso a } 360^{\circ}C}{\text{peso a } 105^{\circ}C} * 100 [9]$$

Para evaluar cuál de los sistemas de cacao captura más carbono, se aplicaron métodos estadísticos descriptivos para cuantificar los resultados obtenidos de la recolección de datos y, a partir de ellos, calcular la biomasa total y el carbono almacenado en cultivos asociados de cacao (Morales, 2021). Para ello, se utilizó la prueba no paramétrica T de Student.

Resultados

Los datos de biomasa aérea revelaron una marcada diferencia entre las dos plantaciones de cacao. Aunque el cacao adulto presentó una biomasa promedio de 4064,40 kg/árbol, considerablemente superior a los 56,84 kg/árbol del cacao joven (Figura 2), esta diferencia no resultó estadísticamente significativa ($p > 0,05$) según la prueba no paramétrica T de Student (Tabla 1).

En cuanto a la acumulación de hojarasca, el cacao adulto alcanzó los 120,60 kg/m², mientras que el cacao joven obtuvo 109,62 kg/m² (Figura 2). Aunque los valores son relativamente próximos, estos datos proporcionan información valiosa sobre la dinámica del ecosistema en cada plantación. La hojarasca, un indicador de la salud del suelo, está influenciada por diversos factores, como la edad de las plantas, el manejo del cultivo y las condiciones ambientales. El análisis de la biomasa total reveló una notable diferencia entre las plantaciones de cacao joven (166,46 kg) y adulto (4185,00 kg), evidenciando una disparidad en su productividad y desarrollo (Figura 2).

El cultivo del cacao joven alcanzó una biomasa total de 108197,05 t/ha y el cultivo de cacao adulto registró un valor de 2720250,00 t/ha lo cual corresponde al número total de plantas en cada sistema de producción (Figura 3). La diferencia de 2612052,95 t/ha destaca claramente el impacto de la edad en la acumulación de biomasa. El cacao adulto, con árboles maduros y sistemas radiculares extensos, ha tenido más tiempo para acumular biomasa mediante la fotosíntesis y el crecimiento natural.

El análisis del carbono capturado en las dos plantaciones de cacao reveló una notable diferencia de 1306026,47 t, reflejando la disparidad en su biomasa total y productividad, directamente proporcional a la edad del cultivo. El cacao joven alcanzó una captura

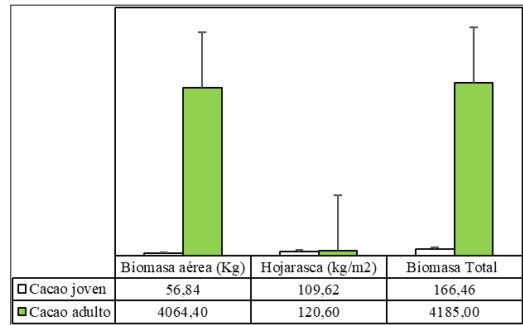


Figura 2. Variables analizadas en cuanto a la biomasa de las plantaciones.

total de carbono de 54098,53 t, mientras que el cacao adulto presentó un valor considerablemente superior de 1360125,00 t. Además, el cacao joven logró una tasa de fijación de carbono de 27049,26 t/año, mientras que el cacao adulto registró 85007,81 t/año, mostrando una diferencia de 57958,55 t/año. Esto demuestra que la edad de la plantación influye significativamente en la capacidad de los árboles de cacao para absorber CO₂ de la atmósfera (Figura 3).

En cuanto a la salud del ecosistema, el análisis de la densidad aparente del suelo en las dos plantaciones de cacao reveló una diferencia sutil, que podría estar relacionada con diversos factores propios de cada sistema. El suelo del cacao joven presenta una densidad aparente de 0,31 g/cc, mientras que el suelo del cacao adulto registra un valor de 0,29 g/cc. Aunque esta diferencia de 0,02 g/cc parece pequeña, puede tener implicaciones en la dinámica del suelo y el desarrollo de las plantas de cacao.

El contenido de materia orgánica (MO) en el suelo de las dos plantaciones de cacao mostró una diferencia de 10,34%, lo que podría tener un impacto significativo en la fertilidad, estructura y salud del suelo. El suelo del cacao adulto presenta un contenido de MO de 27,88% mientras que el suelo del cacao joven un valor de 17,54% (Figura 4).

El análisis del contenido de carbono (%) refleja una diferencia del 6% en el suelo de las dos plantaciones; pues el suelo del cacao joven presenta un contenido de carbono del 10,18%, mientras que el suelo del cacao adulto registra un valor de 16,17%, lo que evidencia la relación que existe entre los diversos factores propios de cada sistema. El suelo del cacao joven presenta un valor de carbono almacenado de 4,73 tC/0,05 ha, mientras que el suelo del cacao adulto registra un valor considerablemente superior de 7,15 tC/0,05 ha.

Tabla 1. Resultados de la prueba no paramétrica de T de student.

| | F | t | Df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference | Std. Error Difference |
|---------------|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| Biomasa aérea | 4,493 | -1,255 | 143 | 0,212 | -4007,56275 | 3193,83241 |
| | | -1,195 | 68,001 | 0,236 | -4007,56275 | 3353,11251 |

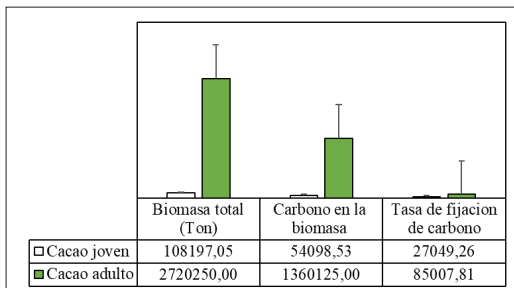


Figura 3. Carbono en la biomasa y tasa de fijación de carbono en las plantaciones analizadas.

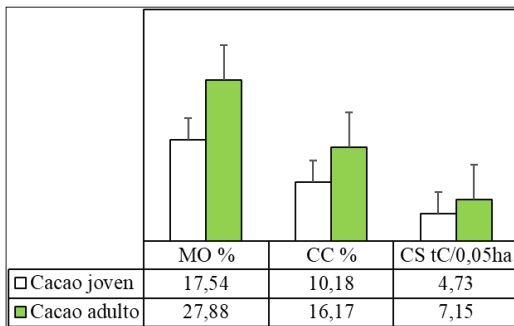


Figura 4. Resultado de las variables de materia orgánica (MO), contenido de carbono (CC) y tasa de fijación de carbono según las plantaciones analizadas.

Esta diferencia de 2,42 tC/0,05 ha resalta el impacto de la edad y el manejo del cultivo en la acumulación de carbono en el suelo.

Discusión

Los resultados de esta investigación revelan que las plantaciones de cacao exhiben una dinámica de biomasa y secuestro de carbono dependiente de la edad, con un aumento significativo en la biomasa de los árboles desde las plantaciones jóvenes (56,84 kg/árbol) hasta las adultas (4064,40 kg/árbol). Esta tendencia coincide con los hallazgos de Gusli et al. (2020) en Indonesia, donde se reportó un rango de biomasa entre 75 y 150 Mg ha⁻¹. Asimismo, en Centroamérica, Somarriba et al. (2013) encontraron que el carbono total promedio en cacao fue de 117 Mg ha⁻¹, con un 42% en biomasa aérea fresca. En Camerún, se calculó un total de carbono en sistemas agroforestales de cacao de 138,1 t C ha⁻¹ (Nadège et al., 2019). Lo cual sugiere que los sistemas de cacao en diferentes regiones pueden tener variaciones significativas en la acumulación de biomasa, posiblemente debido a diferencias en prácticas de manejo, condiciones climáticas y tipos de suelo.

La acumulación de hojarasca en las plantaciones de cacao mostró valores comparables entre el cacao joven y el adulto, con 109,62 kg/m² y 120,60 kg/m² respectivamente. Estos resultados sugieren que, independientemente de la edad de la plantación, esta variable sigue un patrón similar. Se ha reportado

que, en varios sistemas de producción de cacao, todos los componentes de la caída de hojarasca, excepto las ramas, presentan un incremento significativo durante la estación seca, lo que se relaciona con factores climáticos como la intensidad del viento y la desecación, que influyen de manera crítica en la dinámica de la hojarasca, afectando la acumulación y descomposición de la materia orgánica en el suelo (Saj et al., 2021). Lo cual es crucial para el manejo sostenible de las plantaciones de cacao y la salud a largo plazo del ecosistema.

El cacao joven alcanzó una biomasa total de 108197,05 t/ha, mientras que el cacao adulto registró un valor superior de 2720250,00 t/ha, lo que refleja la mayor acumulación de biomasa total en plantaciones más maduras. Cuesta y Arteaga (2021) estimaron que en cada individuo de *Theobroma cacao* se almacenan hasta 51,71 t de carbono. Por su parte, Mustari et al. (2020) determinaron que una plantación de cacao puede secuestrar hasta 33,19 toneladas C/ha. Además, el patrón de acumulación de biomasa está en concordancia con investigaciones previas, que han determinado que la biomasa total en esta especie es directamente proporcional a la edad de la plantación (Goñas et al., 2022).

Las plantaciones de cacao exhiben una dinámica de captura de carbono dependiente de la edad, con un aumento en la captura total de carbono desde la plantación joven (54098,53 t) hasta la adulta (1360125,00 t). Esta diferencia se asocia al mayor crecimiento y biomasa de los árboles en las plantaciones adultas, lo que permite una mayor fijación de carbono a lo largo del tiempo. Sin embargo, las variaciones en la biomasa y el secuestro de carbono entre regiones y sistemas de manejo sugieren la necesidad de investigaciones más detalladas para optimizar las prácticas agrícolas y maximizar el potencial de las plantaciones de cacao como sumideros de carbono (Fonkeng et al., 2024; Goñas et al., 2022; Saj et al., 2021). En Perú, Goñas et al. (2022) encontraron que la reserva total de carbono sobre el suelo en los sistemas de árboles de cacao jóvenes fue de casi la mitad que, en los sistemas de cacao adulto, con una diferencia de 11,22 Mg C/ha; sin diferencias significativas para ninguno de los rangos de edad. Por otra parte, en Colombia, se determinó una acumulación de carbono de 5,3 Mg C/ha en cacao de cuatro años (Mena y Andrade, 2021).

La densidad aparente del suelo presenta una diferencia entre la plantación joven (0,31 g/cc) y la adulta (0,29 g/cc), lo que podría estar asociado a cambios en la estructura del suelo a lo largo del tiempo. Estudios previos han demostrado que el aumento de la densidad aparente, como en el caso del cacao adulto, se asocia con una reducción de la porosidad total, particularmente de los macroporos que limita la capacidad del suelo para conducir agua y afecta negativamente la disponibilidad de agua para las plantas (Supriadi et al., 2022; Gusli et al., 2020). En el suelo del cacao joven el contenido de MO es

de 17,54%, mientras que el suelo del cacao adulto registra un valor superior de 27,88%, lo que refleja una mayor tasa de descomposición y reciclaje de nutrientes en las plantaciones adultas, donde el ciclo de la hojarasca y su descomposición funcionan como un sistema de insumo-producto crucial para el mantenimiento de la materia orgánica en el suelo (Agbotui et al., 2024). Además, los sistemas de manejo y las prácticas agrícolas influyen considerablemente en la acumulación de MO (Afele et al., 2021; Oderinde y Afolayan, 2021).

El suelo del cacao joven presenta un contenido de carbono del 10,18%, mientras que el suelo del cacao adulto registra un valor de 16,17%. La mayor cantidad de carbono orgánico del suelo se almacena entre 0 y 30 cm de profundidad, coincidiendo con la profundidad a la que existe entre el 80 y el 85 % de la estera de raíces laterales del cacao, es de indicar que el almacenamiento de carbono orgánico del suelo depende de la profundidad, el sistema de gestión, la región y la cantidad y calidad de los aportes de la hojarasca (Asigbaase et al., 2021).

Las plantaciones de cacao presentan una dinámica compleja en el almacenamiento de carbono orgánico, influenciada por la edad y las prácticas de manejo. Se ha demostrado que el cacao en sistemas agroforestales puede almacenar hasta 30 Mg C/ha más que en monocultivo (Miharza et al., 2023). El suelo del cacao adulto presenta un mayor contenido de carbono (16,17%) debido a la alta tasa de producción de hojarasca y su rápida descomposición, lo que genera un flujo constante de materia orgánica al suelo (Asigbaase et al., 2021). En contraste, el suelo del cacao joven muestra un menor contenido de carbono (10,18%).

Los hallazgos de esta investigación revelan que las plantaciones adultas de cacao exhiben una tasa de fijación de carbono superior a las plantaciones jóvenes, lo cual se atribuye a la capacidad de una mayor acumulación de biomasa a lo largo del tiempo. En el suelo de las plantaciones jóvenes de cacao, el carbono almacenado es de 4,73 tC/0,05 ha, mientras que en el suelo de las plantaciones adultas se almacenan 7,15 tC/0,05 ha. Salvador et al. (2020), en plantaciones de 70 años, determinaron un total de 47,25 tC/ha. Cabe destacar que las plantaciones de cacao pueden actuar como sumideros de carbono de gran capacidad, con un potencial de almacenamiento total de hasta 86,6 tC/ha (Hernández et al., 2021). En adición, Supriadi et al. (2022) establecieron mediante una revisión que, el promedio total de carbono almacenado por sistemas agroforestales de cacao es de 124,69 tonC/ha.

La determinación de la biomasa aérea, la acumulación de hojarasca y otros indicadores son esenciales para plantear estrategias de manejo sostenible y evaluar la salud de los ecosistemas de cacao. Miharza et al. (2023) encontraron que, la cobertura del dosel, la densidad de árboles y el carbono orgánico del suelo

mostraron una correlación positiva con las reservas de carbono, y una correlación negativa con la huella de carbono. Esto sugiere que los agrobosques de cacao son sistemas de gestión climáticamente sostenibles, capaces de mantener altas reservas de carbono y bajas huellas de carbono (Supriadi et al., 2022).

Conclusión

Los sistemas de producción de cacao, especialmente aquellos gestionados de manera sostenible, desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático gracias a su capacidad para capturar carbono tanto en la biomasa como en el suelo. Es importante señalar que, aunque tanto las plantas de cacao joven como el adulto participan en la fijación de carbono, las plantas adultas, al tener una mayor biomasa, son más eficientes en la captura de carbono, alcanzando 1360125,00 t, en comparación con la plantación de cacao joven que capturan 54098,53 t. En consecuencia, el suelo bajo cultivo de cacao adulto almacena más carbono (7,15 tC/0,05 ha) en comparación con el suelo bajo cultivo de cacao joven (4,73 tC/0,05 ha). Promover prácticas sostenibles que incorporen material orgánico y reduzcan las perturbaciones del suelo puede aumentar significativamente los niveles de materia orgánica, lo que a su vez mejora la fertilidad del suelo y su capacidad de secuestro de carbono. Por lo tanto, es esencial implementar estrategias de manejo que optimicen estos procesos para maximizar la salud del suelo y asegurar la productividad sostenible de las plantaciones de cacao a largo plazo.

Recomendaciones

Profundizar en la investigación sobre la captura y almacenamiento de carbono en sistemas de producción de cacao como servicio ambiental y su aporte contra el cambio climático.

Estos estudios no solo buscan una comprensión más profunda de los procesos de captura de carbono en las plantaciones de cacao, sino también la implementación de prácticas innovadoras que los potencien y generen beneficios tanto a los productores como para la mitigación del cambio climático en el planeta.

Referencias Bibliográficas

- Albán, O. (2023). Determinación de metales pesados en suelos de cultivo y en granos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao L.*) pertenecientes a la zona litoral central del Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/37932/1/CBT%20021.pdf>
- Afele, J. Dawoe, E. Abunyewa, A. Afari, V., y Asare, R. (2021). Carbon storage in cocoa growing systems across different agroecological zones in Ghana. *Pelita Perkebunan*, 37(1), 32-49. <https://biblio1.iita.org/handle/20.500.12478/7154>
- Agbotui, D. Ingold, M. y Buerkert, A. (2024). Carbon and nutrient cycling in cocoa agroforests under organic and conventional management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-024->

- 10349-6
- Arroyo, M. y Ramírez, A. (2020). Dióxido de carbono, sus dos caras. 116(2), 81-87. <https://analisesdequimica.es/index.php/AnalisesQuimica/article/view/1316/1893>
- Asigbaase, M. Dawoe, E. Lomax, B. H. y Sjogersten, S. (2021). Biomass and carbon stocks of organic and conventional cocoa agroforests, Ghana. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 306(107192), 107192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107192>
- Ayuso, S. (2020). ¿Cómo contabilizar el impacto ambiental de las empresas? El caso de las emisiones de gases de efecto invernadero. *Revista de Estudios Empresariales. Segunda Época*, 2, 94-111. <https://doi.org/10.17561/ree.v2020n2.6>
- Bravo, M. Ruiz, M. y Sablón, N. (2020). Prospectivas de la economía circular en la cadena agroalimentaria del cacao ecológico fino de aroma en la provincia de Manabí. 37, 95-110. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Monserrate-Ruiz-Cedeno-2/publication/344196945_Prospectivas_de_la_economia_circular_en_la_cadena_agroalimentaria_del_cacao_ecologico_fino_de_aroma_en_la_provincia_de_Manabi/links/5f5aae65a6fdcc1164092cda/Prospectivas-d
- Castillo, R. Rodríguez, B. y Bravo, K. (2022). Fijación de carbono (Co2) del arbolado de los parques La Rotonda y La Madre, Manabí, Ecuador. Obtenido de <https://www.editorialibkn.com/index.php/Yachasun/article/view/193/327>
- Centro de investigación y acción colectiva [FARO]. “¿Cómo contribuye el Ecuador a la reducción de emisiones de GEI?” Grupo-Faro, 28 January 2022, <https://grupofaro.org/gases-efecto-invernadero-ecuador/>.
- Carvajal, B. y Andrade, J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Cevallos, A. Quinchuela, J. Paucar, J. y Cevallos, J. (2022). Diagnóstico para el diseño de una estación meteorológica en monitoreo de cacao. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/364537499_Diagnostico_para_el_diseño_de_una_estación_meteorologica_en_monitoreo_de_plantaciones_de_cacao
- Cuesta, K. y Arteaga, R. (2021). Estimación de captura de carbono en el Sistema Agroforestal de *Theobroma cacao* L., en Jamal, Baracoa. *Hombre, Ciencia y Tecnología*, 25(4) 44-53. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/441/4412849005/4412849005.pdf>
- Dilas, J. y Huaman, A. (2020). Captura de carbono por un bosque montano de neblina del Perú. *Alpha Centauri*, 1(3), 13-25. <https://doi.org/10.47422/ac.v1i3.16>
- Epquin, M. (2021). Impactos ambientales en fincas de cacao mediante el balance de carbono y nutrientes, región Amazonas. Obtenido de <https://doi.org/10.25127/ucni.v4i3.811>
- European Forest Institute [EFI]. (2021). Diagnóstico de la cadena de valor del cacao, y mapeo de los indicadores y sistemas de información existentes. https://euredd.efi.int/wp-content/uploads/2022/09/Informe-1_Diagnostico-cadena-Cacao_Ecuador.pdf
- Fonkeng, E. Chevallier, T. Sauvadet, M. Enock, S. Rakotondrazafy, N. Chapuis-Lardy, L. Takoutsing, B. Tabi, O. y Harmand, J. (2024). Dynamics of soil organic carbon pools following conversion of savannah to cocoa agroforestry systems in the Centre region of Cameroon. *Geoderma Regional*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00758>
- Gañas, M. Rojas, N. B. Culqui, C. Arce, M. Marlo, G. Pariente, E. y Oliva, M. (2022). Carbon sequestration in fine aroma cocoa agroforestry systems in Amazonas, Peru. *Sustainability*, 14(15), 9739. <https://doi.org/10.3390/su14159739>
- Gusli, S. Sumeni, S. Sabodin, R. Muqfi, I. H. Nur, M. Hairiah, K. Useng, D. y Van Noordwijk, M. (2020). Soil organic matter, mitigation of and adaptation to climate change in cocoa-based agroforestry systems. *Land*, 9(9), 323. <https://doi.org/10.3390/land9090323>
- Hernández, G. (2021). Emisiones de gases de efecto invernadero y sectores clave en Colombia. *El Trimestre Económico*, 88(350), 523-550. <https://doi.org/10.20430/ete.v88i350.857>
- Hernández, H. Andrade, H. Suárez, J. Sánchez., J. Gutiérrez., D. Gutiérrez, G. Trujillo, E. y Casanoves, F. (2021). Carbon storage in agroforestry systems in Colombia's Eastern Plains. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Manchabajoy, J. Andrade, D. y Castillo, A. (2022). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5600/560070786003/html/>
- Mena, V. y Andrade, H. (2021). Potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en bosques y sistemas agroforestales con cacao en el Pacífico colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 69(4), 1252-1263. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i4.45927>
- Miharza, T. Wijayanto, N. Roshetko, J. M. y Siregar, I. (2023). Carbon stocks and footprints of smallholder cacao systems in Polewali Mandar, West Sulawesi. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.680984>
- Morales, J. (2021). *Determinación de secuestro de carbono Terminalia catappa L. (especie exótica) mediante la aplicación de ecuaciones alométrica en Isla Santay*. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MORALES%20CONSUEGRA%20JANDRY%20MARTIN.pdf>
- Mustari, K. Asrul, L. Kaimuddin, Y. Faradilla, L. (2020). Carbon stock analysis of some cocoa planting systems in South Sulawesi. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 486(1), 012085. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012085>
- Nadège, M. T. Louis, Z. Cédric, C. D. Louis-Paul, K. B. Funwi, F. P. Ingrid, T. T. Clotex, T. V. Flore, N. Y. A. Bruno, T. M. R. y Julliette Mancho, N. (2019). Carbon storage potential of cocoa agroforestry systems of different age and management intensity. *Climate and Development*, 11(7), 543-554. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1456895>
- Oderinde, F. y Afolayan, O. (2021). Evaluation of the capacity of agroforestry of cocoa trees in atmospheric carbon dioxide reduction. *Journal of Applied Sciences & Environmental Management*, 25(7), 1231-1237. <https://doi.org/10.4314/jasem.v25i7.19>
- Orellana y Landi. “Estimación de la captura de carbono de la flora arbórea de la ribera del río Tarqui en la zona urbana de la ciudad de Cuenca.” Repositorio UPS, 3 marzo 2023, <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24504>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2020). Las emisiones de CO2 rompen otro récord: un calentamiento global catastrófico amenaza el planeta | Noticias ONU. 2020. Retrieved January 12, 2024, from <https://news.un.org/es/story/2020/12/1485312>
- Parga, R. Villarroel, C. Campos, A. Gallardo, R. y Asenjo, G. (2021). Inventario forestal nacional de bosques nativos y actualización de plantaciones forestales. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/32050/32050.pdf?sequence=1>
- Patiño, J. Ruiz, A. y Pitre, R. (2018). *El emprendimiento en Colombia, una respuesta a los retos de competitividad y desarrollo sostenible*, 39(14), 24. Obtenido de <https://www.revistasespacios.com/a18v39n14/18391424.html>
- Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Tosagua 2015 - 2019 [PDOTCT]. (2015-1019). Obtenido de https://drive.google.com/file/d/0BwRMzL74KvcfWFLWwLzWR043eVU/view?resourcekey=0-ID_6n-80RU3a73UIJ9MU6Q
- Ramos, P. Castro, M. Pesca, A. Vargas, Y. Escobar, L. y Rojas,

- M. (2021). Estructura y composición florística de bosques asociados a especies de *Theobroma* en la Amazonia colombiana. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 128-150. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1078>
- Romero, M. Velasco, E. Meza, D. y Pérez, R. (2022). Análisis y estimación del contenido de carbono en pastizales halófilos de la zona central semi-árida de México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1007>
- Sabatés, L. y Roca, J. (2020). La revisión de la literatura científica: Pautas, procedimientos y criterios de calidad. 2020. https://ddd.uab.cat/pub/recdoc/2020/222109/revliltcie_a2020.pdf
- Saj, S. Nijmeijer, A. Nieboukaho, J. E. Lauri, P. y Harmand, J. (2021). Litterfall seasonal dynamics and leaf-litter turnover in cocoa agroforests established on past forest lands or savannah. *Agroforestry Systems*, 95(4), 583-597. doi:10.1007/s10457-021-00602-0
- Salvador, P. Martínez, J. Cámara, L. y Zequeira, C. (2020). Estructura y carbono específico en una cronosecuencia de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en Tabasco, México. *Madera y bosques*, 26(3), e2632131. Epub 17 de febrero de 2021. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632131>
- Somarrriba, E. Cerda, R. Orozco, L. Cifuentes, M. Dávila, H. Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E. Poveda, V. Astorga, C. Say, E. y Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Suárez, G. Avendaño, C. Ruíz, P. y Estrada, P. (Septiembre de 2019). Diversidad arbórea y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas, México. 25(3). Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-40182019000300315&script=sci_arttext&tlng=es
- Supriadi, H. Astutik, D. y Sobari, I. (2022). The role of agroforestry based cocoa on climate change mitigation: A review. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 974(1), 012135. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/974/1/012135>
- Surco, O. y Garate, J. (2022). Reservas de carbono en cuatro sistemas agroforestales combinadas con *Theobroma cacao* L., Madre de Dios. *Revista Amazónica de Ciencias Básicas y Aplicadas*, 1(1), e147. <https://doi.org/10.55873/racba.v1i1.147>